

学校编码: 10384
学 号: 23120110154076

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

量子点光纤激光和光子晶体光纤非线性激光特性的
研究

Study on Characteristics of Quantum Dot Fiber laser and
Photonic Crystal Fiber Nonlinear Lasers

程辉辉

指导教师姓名: 董 俊 教 授

罗正钱 副教授

J. Gary Eden 教 授

专 业 名 称: 电 路 与 系 统

论文提交日期: 2015 年 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 月

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23120110154076

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

量子点光纤激光和光子晶体光纤非线性激光
特性的研究

Study on Characteristics of Quantum Dot Fiber laser and
Photonic Crystal Fiber Nonlinear Lasers

程 辉 辉

指导教师姓名: 董 俊 教 授

罗正钱 副教授

J. Gary Eden 教授

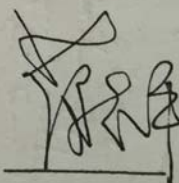
专 业 名 称: 电 路 与 系 统

论文提交日期: 2015 年 6 月

论文答辩时间: 2015 年 6 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席:



评 阅 人: _____

2015 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 程辉辉

2015 年 6 月 8 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

() 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：程辉辉

2015年6月8日

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

目 录	I
Contents	IV
摘 要	VII
ABSTRACT.....	IX
第一章 绪论	1
1.1 光纤激光器	1
1.1.1 掺杂稀土离子光纤激光器.....	3
1.1.2 非线性光纤激光器.....	4
1.2 本文的研究意义	5
1.2.1 量子点/光纤激光器的研究意义	5
1.2.2 中红外光纤参量振荡器的研究意义.....	6
1.2.3 超连续谱光纤光源的研究意义.....	7
1.3 本文的工作安排	9
第二章 文献综述	10
2.1 量子点光纤激光器的研究进展	10
2.1.1 量子点激光器的研究进展.....	10
2.1.2 随机激光器的研究进展.....	12
2.1.3 量子点光纤激光器的研究进展.....	14
2.2 中红外光纤参量振荡器的研究进展	15
2.2.1 中红外光纤的研究进展.....	15
2.2.2 中红外光纤激光器的研究进展.....	16
2.2.3 基于四波混频的中红外光纤激光器的研究进展.....	17
2.3 超连续谱光源的研究进展	18
2.3.1 超连续光谱研究进展.....	18
2.3.2 腔内泵浦的光纤超连续光谱的研究进展.....	23
2.4 本章小结	24
第三章 纳米晶体量子点及其受激辐射	26

3.1 什么是量子点?	26
3.1.1 量子点的光学性质	26
3.1.2 量子点的制备	28
3.1.2.1 有机体系合成量子点	29
3.1.2.2 水相体系合成量子点	30
3.2 量子点的增益和受激辐射	31
3.2.1 量子点的光学增益	31
3.2.2 量子点的受激辐射	36
3.3 本章小结	39
第四章 沉积量子点到光学光纤: 平顶模式光束质量的量子点/光纤激光器	40
4.1 实验材料和器材	40
4.1.1 量子点	40
4.1.2 无芯光纤	43
4.1.3 泵浦源	43
4.1.4 增强电荷耦合器件 ICCD (高速照相机)	44
4.1.5 其它实验器件	44
4.2 量子点/光纤振荡器样品	46
4.2.1 量子点光纤振荡器样品	46
4.2.2 胶状量子点团簇	48
4.3 量子点/光纤激光实验	49
4.3.1 量子点/光纤激光器的实验原理	49
4.3.2 光谱的演化	50
4.3.3 时域波形	52
4.3.4 输出激光的脉冲能量	57
4.3.5 光谱的稳定性	60
4.3.6 激光光束特性的 ICCD 图像	61
4.4 本章小结	65
第五章 石英和碲化物光子晶体光纤中红外光纤参量振荡器的模型及其优化	67
5.1 石英材料光子晶体光纤的中红外参量振荡器	67

5.1.1 光纤波导对非线性特性的影响.....	68
5.1.2 石英光纤中红外参量振荡器模型.....	73
5.1.3 石英光纤中红外参量振荡器的仿真结果.....	79
5.2 碲化物光子晶体光纤中红外参量振荡器	82
5.2.1 软玻璃材料的光学特性.....	82
5.2.2 碲化物光纤波导结构优化.....	85
5.2.3 碲化物光纤中红外参量振荡器模型.....	91
5.2.4 碲化物光纤中红外参量振荡器的仿真结果.....	94
5.3 本章小结	99
第六章 调 Q 光纤激光器腔内激发光子晶体光纤的超连续谱产生以及优化	100
6.1 1064 nm 腔内泵浦光子晶体光纤的超连续谱产生.....	100
6.1.1 光子晶体光纤及光学特性.....	100
6.1.2 实验原理和器件.....	103
6.1.3 超连续光谱产生.....	106
6.1.4 时域波形演化.....	109
6.1.5 调 Q 重复频率的影响.....	112
6.1.6 调制占空比的影响.....	115
6.2 1067 nm 腔内泵浦光子晶体光纤的超连续谱产生.....	118
6.2.1 1067 nm 腔内泵浦的实验装置	118
6.2.2 1067 nm 腔内泵浦的超连续谱产生	120
6.2.3 重复频率和调制占空比的优化.....	125
6.3 本章小结	128
第七章 总结与展望	129
7.1 本论文主要研究内容与结论	129
7.2 有待进一步研究的问题	131
参考文献	133
读博期间取得的科研成果	153
致 谢	156

Contents

Contents in Chinese	I
Contents in English	IV
Abstract in Chinese.....	VII
ABSTRACT.....	IX
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Fiber Laser.....	1
1.1.1 Rare-Earth-Doped Fiber lasers	3
1.1.2 Nonlinear Fiber Lasers.....	4
1.2 Significance of this Research	5
1.2.1 Significance of Research on Quantum Dot Fiber Lasers.....	5
1.2.2 Significance of Research on MIR Fiber Optics Parametric Oscillator	6
1.2.3 Significance of Research on Supercontinuum Fiber Source.....	7
1.3 Outline of this Thesis	9
Chapter 2 Literature Review	10
2.1 Research Progress of Quantum Dot Fiber Lasers	10
2.1.1 Research Progress of Quantum Dot Lasers	10
2.1.2 Research Progress of Random Lasers	12
2.1.3 Research Progress of Quantum Dot Fiber Lasers	14
2.2 Research Progress of MIR Fiber Optics Parametric Oscillators	15
2.2.1 Research Progress of MIR Fibers	15
2.2.2 Research Progress of MIR Fiber Lasers	16
2.2.3 Research Progress of MIR Fiber Lasers Based on Four-Wave Mixing.....	17
2.3 Research Progress of Supercontinuum Fiber Sources.....	18
2.3.1 Research Progress of Supercontinuum Generation.....	18
2.3.2 Research Progress of Intracavity-Pumped Supercontinuum Generation....	23
2.4 Summary of this Chapter	24
Chapter 3 Nanocrystal Quantum Dot and its Stimulated Emission	26
3.1 What is Quantum Dot?.....	26
3.1.1 Optical Characteristics of Quantum Dot.....	26
3.1.2 Production of Quantum Dot.....	28
3.1.2.1 QD Synthesis in Organic System.....	29

3.1.2.2 QD Synthesis in Water System	30
3.2 Optical Gain and Stimulated Emission of Quantum Dot.....	31
3.2.1 Optical Gain of Quantum Dot.....	31
3.2.2 Stimulated Emission of Quantum Dot	36
3.3 Summary of this Chapter	39
Chapter 4 Coupling Quantum Dots to Fiber: Laser with Top Hat Beam Profile	40
4.1 Experimental Materials and Equipments.....	40
4.1.1 Quantum Dot.....	40
4.1.2 Coreless Fiber	43
4.1.3 Pump Source	43
4.1.4 ICCD	44
4.1.5 The Others.....	44
4.2 Sample of Quantum Dot/Fiber Oscillator	46
4.2.1 Sample of Oscillator.....	46
4.2.2 Colloidal Quantum Dot Clusters.....	46
4.3 Experiment of Quantum Dot/Fiber Laser	48
4.3.1 Schematic of Quantum Dot/Fiber Laser	49
4.3.2 Spectral Evolution.....	50
4.3.3 Waveforms in Time	52
4.3.4 Output Pulse Energy	57
4.3.5 Stability of the Laser Spectra	60
4.3.6 ICCD Images of Beam Profile.....	61
4.4 Summary of this Chapter	65
Chapter 5 Modeling and Optimization of MIR Fiber Optical Parametric	
Oscillators Based on Silica and Tellurite Photonic Crystal Fibers	67
5.1 MIR FOPO Based on Silica Photonic Crystal Fiber	67
5.1.1 Dependence of Waveguide on Nonlinear.....	68
5.1.2 Modeling of MIR FOPO based on Silica PCF	73
5.1.3 Results and Discussion	79
5.2 MIR FOPO Based on Tellurite Photonic Crystal Fiber	82
5.2.1 Softglass Fiber Materials	82
5.2.2 Optimization of Tellurite PCF Waveguide.....	85
5.2.3 Modeling of MIR FOPO based on Tellurite PCF	91

5.2.4 Results and Discussion	94
5.3 Summary of this Chapter	99
Chapter 6 Supercontinuum Generation and Optimization of PCF Intracavity	
Excited Q-Switched Fiber Lasers	100
6.1 SC Generation by 1064 nm intracavity Pumping	100
6.1.1 Characteristics of PCF	100
6.1.2 Experimental Schematic and Equipments	103
6.1.3 SC Generation	106
6.1.4 Waveform Evolution in Time	109
6.1.5 Dependence of Q-Switched Repetition Rate	112
6.1.6 Dependence of Modulation Duty	115
6.2 SC Generation by 1067 nm Intracavity Pumping	118
6.2.1 Experiment Schematic of 1067 nm-Intracavity-Pumping	118
6.2.2 SC Generation of 1067 nm-Intracavity-Pumping	120
6.2.3 Optimization of Repetition Rate and Modulation Duty	125
6.3 Summary of this Chapter	128
Chapter 7 Summary and Outlook	
7.1 Contents and Conclusions of the Dissertation	129
7.2 Deficiencies and Future Work	131
References	133
Publications and Patents during Graduated Student	153
Acknowledgements	156

摘 要

光纤激光器因具备结构紧凑、光束质量好、高效率、高功率、高可靠性等优点被认为是最具潜力的激光源。本文对三种光纤激光光源做了系统的研究：基于纳米晶体量子点光纤激光器、基于光子晶体光纤四波混频效应的参量振荡器、以及光子晶体光纤非线性效应超连续谱光源。相对于传统的量子点随机激光器糟糕的激光模式和糟糕的输出激光方向，首先介绍了一种新型的量子点/光纤激光器，该激光器获得了光强分布集中的平顶模式的光束特性，对量子点激光器的集成化有重要的意义。随后在目前获得的基于光子晶体光纤四波混频的中红外转换效率非常低的背景下，提出了一种新型的中红外光纤光学参量振荡器模型，用来指导实验。最后，利用光子晶体光纤的非线性效应，在实验中实现了从可见光到中红外的结构简单、阈值低的超连续光谱。

首先，通过直接沉积 28-31 层单层厚度约为 8 nm 的量子点到 125 μm 直径的无芯光纤的外表面，获得了一个新型的量子点/光学光纤的可见光激光振荡器。光学光场直接从大约 244 nm 厚的 CdSe/ZnS 量子点薄膜耦合进入光学光纤，从而获得了泵浦阈值能量密度小于 2.6 mJ cm^{-2} ，波长约为 644 nm 的红光激光器。该振荡器中从体积约为 $4.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ 的量子点增益中获得了 37 W 的峰值功率，对应脉冲宽度和脉冲能量分别为 3.6 ns 和 134 nJ。实验证明了光谱和时域上变窄的输出激光特性，获得的激光光束特性表现出近似平顶模式，对光学集成器件与系统有重要的意义。

其次，为了获得高效的四波混频中红外闲频光输出，我们比较了三种商业化的石英光纤与四波混频相关的色散特性、相位匹配特性。利用光纤的四波混频效应，提出了一种新型的信号光单谐振腔的参量振荡器。修正了在正色散区泵浦（泵浦光、信号光、闲频光波长差异较大）条件下四波混频耦合波方程组，在方程组中考虑为高阶群速度色散、损耗、非线性系数、自相位调制、交叉相位调制和模场面积，是目前相对完备的简并四波混频耦合波方程组。利用商业化的光子晶体光纤 NKT LMA8 作为增益数值仿真该模型，清楚地理解了泵浦功率、光纤长度等对参量能量转移、阈值以及转换效率的影响，获得了输出中红外波长为 2.61 μm 时转换效率为 7.1% 的中红外闲频光。为了进一步提高中红外的转换效率，提出

了用碲化物软玻璃材料来代替石英材料制备光子晶体光纤。设计了一种在中红外波段低损耗、高非线性系数的碲化物光子晶体光纤，计算了该光纤的零色散波长为 $1.63\ \mu\text{m}$ ，当用泵浦光波长为 $1.57\ \mu\text{m}$ 泵浦时，满足相位匹配的信号光和闲频光波长分别位于 1.054 和 $3.105\ \mu\text{m}$ 。通过理论模拟耦合波方程组，我们分析了碲化物光子晶体光纤、单谐振腔和泵浦源对中红外光纤参量振荡器的影响：（1）尽管增加碲化物光纤的长度使得中红外光纤参量振荡器的泵浦阈值小到几瓦的量级，但是为了获得更高的中红外转换效率常常需要优化的、相对较短的、低损耗的光子晶体光纤。（2）相比于之前单通结构获得的非常低的中红外转换效率，我们获得的最高的 11.2% 的中红外转换效率比之前提升了几十倍。

最后，通过直接将光子晶体光纤熔接到光纤激光器的腔内，获得了超低泵浦阈值的调 Q 全光纤超连续光源。对于光纤布拉格光栅的反射波长为 $1064\ \text{nm}$ 时，获得了平坦的从 $500\text{-}1950\ \text{nm}$ 的超连续光谱，超连续光谱的阈值低于 $420\ \text{mW}$ 。还优化了调 Q 重复频率和调制占空比对超连续光谱的影响。通过观察光谱和时域脉冲的演化，我们实验理解了这种长脉冲腔内泵浦的超连续光谱产生的物理机理。当重复频率为 $100\ \text{Hz}$ ，调制占空比为 5% 时，超连续光谱的阈值低于 $0.3\ \text{W}$ ，这是目前报道的超连续光谱最低的阈值。为了探索泵浦波长与光纤零色散波长差值对超连续光谱的影响，进一步使用反射波长为 $1067\ \text{nm}$ 的光纤布拉格光栅构成提供调 Q 脉冲的谐振腔，使泵浦光子晶体光纤的波长更加远离光纤的零色散波长 $1055\ \text{nm}$ 。将掺镱光纤长度从 $10\ \text{m}$ 减少为 $4\ \text{m}$ ，采用之前相类似腔内泵浦结构超连续光谱的 $976\ \text{nm}$ 激光二级管的阈值升高到 $1.72\ \text{W}$ 。但是获得了更加平坦、超连续光谱范围更宽的从 $465\ \text{nm}\text{-}2100\ \text{nm}$ 的超连续光谱。

关键词：光纤激光器；量子点；量子点激光器；中红外；四波混频；光子晶体光纤；碲化物玻璃；超连续谱产生；调 Q 光纤激光器；腔内泵浦。

ABSTRACT

Fiber lasers having advantages of compact structure, good beam quality, high efficiency, high power, high reliability are considered the most promising laser sources. In this work, we focus on there fiber light sources: nanocrystal quantum dot/fiber laser, parametric oscillator based on the degenerated four-wave mixing (FWM) of both silica and tellurite photonic crystal fiber (PCF), and supercontinuum generation based on PCF nonlinear effect. First, compared to the traditional quantum dot random laser which have generally suffered from poor beam quality, as well as multiline and temporally-varying emission spectra, a novel hybrid quantum dot/fiber laser was experimental demonstrated. The hybrid laser beam intensity profile approximates a top hat, which is helpful for optical system integration. Second, duo to the MIR conversion efficiency reported based on degenerate FWM of PCF are very low, we proposed and modeled a novel MIR fiber optical parametric oscillator (FOPO) using silica and tellurite PCF, to guide the experiment. At last, by exploiting the nonlinear effect of PCF, a stable and low-threshold supercontinuum from visible to MIR is obtained.

Firstly, direct coupling of the optical field in a ~ 244 nm thick, CdSe/ZnS quantum dot film to an optical fiber has yielded lasing in the red ($\lambda \sim 644$ nm) with a threshold pump energy density $< 2.6 \text{ mJ cm}^{-2}$. Comprising 28–31 layers of ~ 8 nm diameter quantum dots deposited onto the exterior surface of a $125 \mu\text{m}$ diameter coreless silica fiber, this free-running oscillator produces 134 nJ in 3.6 ns FWHM pulses which correspond to 37 W of peak power from an estimated gain volume of $\sim 4.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$. Lasing was confirmed by narrowing of the output optical radiation in both the spectral and temporal domains, and the laser beam intensity profile approximates a top hat.

Secondly, in order to obtain a high-efficiency MIR idle, the dispersion and phase-matching of three kinds of silica PCF were compared. By exploiting FWM of PCF, a novel signal-resonant-cavity was proposed for the first time. The

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.